

## **РАЗРАБОТКА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ПЕЧИ КИПЯЩЕГО СЛОЯ (КС) ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЦИНКОВОГО КУПОРОСА МЕТОДОМ ВЫПАРИВАНИЯ**

### **Аннотация**

*Статья посвящена тепловой работе печи кипящего слоя для выпаривания цинкосо-держащих растворов с целью получения цинкового купороса. На примере сушилок того же типа кратко рассмотрены этапы развития схем подготовки сушильного агента для создания псевдооживленного слоя. На основе анализа размера частиц рассчитана скорость витания, необходимая для их поддержания во взвешенном состоянии. Описана схема работы выпарной установки типа КС. В заключение составлены тепловой баланс топочной камеры для расчета коэффициента расхода воздуха, необходимого для горения газа и дальнейшего разбавления продуктов сгорания; материальный баланс, который является основой для теплового баланса печи КС. Расход природного газа рассчитан из уравнения теплового баланса печи. Предложены меры сокращения определяющих расходных статей.*

*Ключевые слова: печь, слой, кипящий слой, цинковый купорос, расход, воздух, газ, баланс, продукты сгорания.*

### **Abstract**

*The article is devoted to thermal performance of fluid-bed furnace, which is used to obtain zinc sulfate through evaporization of zinc-containing solutions. Using drying furnace of the same kind as an example, preparation systems development stages of drying agent for fluidized bed production are briefly examined. Based on particle size analysis terminal velocity, needed to keep particles in suspension state, is calculated. Also, workflow of fluidized bed evaporator system is presented. Finally, combustion chamber heat balance is accounted to calculate air flow coefficient, necessary for gaseous combustion and further combustion products dilution; mass balance, which is the basis for fluidized bed furnace heat balance. Natural gas flow rate is deduced from the furnace heat balance equation. Outlay accounts reduction measures are also presented.*

*Keywords: furnace, bed, fluidized bed, zinc sulfate, flow rate, air, gas, balance, combustion products.*

Цинковый купорос широко применяют в производстве вискозы, в качестве микроудобрения для повышения плодородия почвы, как добавку к кормам, для пропитки древесины, в гальванотехнике, для приготовления минеральных красок [1].

Создание участка производства цинкового купороса направлено на увеличение мощности гидрометаллургического цеха (ГМЦ) по выпуску товарной продукции в связи с увеличением объемов переработки цинкосодержащего сырья.

Цинковый купорос получают выпариванием и кристаллизацией из растворов.

Известен способ обезвоживания растворов, включающий фракционную кристаллизацию путем выпаривания. Технологическая схема заключается в выпаривании раствора до плотности 1,58-1,6 г/см<sup>3</sup>. Выпаренный раствор выпускают в кессонированные кристаллизаторы, где он охлаждается до температуры 20°С. Далее выпавшие кристаллы отфильтровывают и сушат. Указанный способ имеет низкую производительность, многостадийность процесса, повышенную влажность готового продукта (до 44%), продукт не гранулирован и способен слеживаться [2].

Наиболее эффективным способом является выпаривание в печи кипящего слоя.

Технология выпаривания по своей сути близка к технологии сушки в кипящем слое (рисунок 1), за исключением способа подачи материала (раствор подается через форсунки, расположенные над зеркалом «кипящего слоя»).

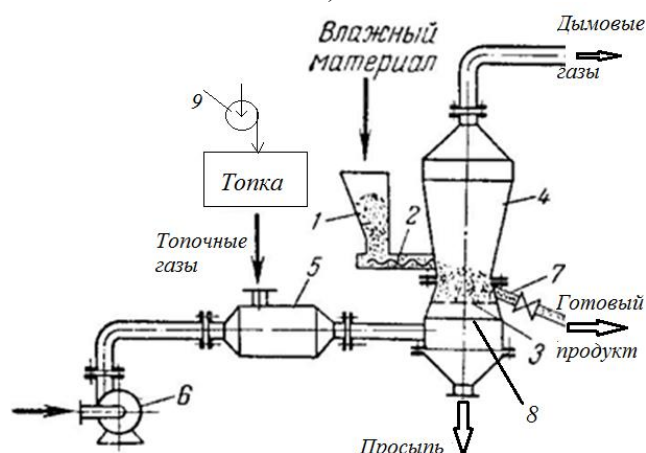


Рис. 1. Сушильная печь непрерывного действия:

- 1 – бункер; 2 – питатель; 3 – газораспределительная решетка; 4 – камера сушки;
- 5 – смесительная камера; 6 – вентилятор для подачи воздуха на разбавление;
- 7 – штуцер для выгрузки высушенного материала; 8 – газовая камера; 9 – вентилятор.

Технология сушки имела несколько этапов развития. Эти сушилки являются одним из прогрессивных типов аппарата. Процесс в кипящем слое позволяет значительно увеличить поверхность контакта между частицами материала и сушильным агентом, интенсифицировать испарение влаги из материала.

Высушиваемый материал подается из бункера 1 питателем 2 в слой материала, «кипящего» на газораспределительной решетке 3 в камере сушки 4. Топочные газы и вторичный воздух подаются в смесительную камеру 5 вентиляторами, полученный сушильный агент проходит с заданной скоростью через отверстия решетки 3 и поддерживает на ней материал в кипящем (псевдооживленном) состоянии. Высушенный материал ссыпается через штуцер 7, расположенный несколько выше решетки 3.

В сушилках этого типа с цилиндрическим корпусом наблюдается значительная неравномерность сушки, обусловленная тем, что при интенсивном перемешивании в слое время пребывания отдельных частиц существенно отличается от его средней величины. Поэтому применяют сушилки с расширяющимся кверху сечением, например, коническим. Благодаря снижению скорости газов по мере их подъема улучшается распределение частиц по крупности и уменьшается унос пыли [3]. Скорость газа внизу камеры должна превышать критическую скорость самых крупных частиц, а вверху – быть меньше скорости уноса самых мелких частиц. Расчет скорости витания выполнен исходя из минимального (0,8 мм) и максимального (6,0 мм) размеров частиц с использованием критериев Архимеда и Рейнольдса. Скорость газового потока принимают в интервале граничных скоростей, то есть больше критической скорости частиц максимальных размеров (скорости начала псевдооживления) и меньше скорости уноса частиц минимальных размеров. Следовательно, расчетное значение скорости потока воздуха в слое 3–4 м/с.

Недостатками представленной схемы являются: 1) наличие отдельной топки с вентилятором; 2) наличие смесительной камеры; 3) подача сушильного агента в камеру осуществляется с помощью одного канала – такой подвод агента не обеспечивает равномерного распределения газовой среды по отверстиям газораспределительной решетки; 4) повышенный расход тепловой энергии за счет потерь теплоты в топке, смесителе и в соединительных трубопроводах.

Применение теплогенераторов типа ВОСТИО или ВНИИМТ позволило при сохранении того же вида топлива (природный газ) исключить топку и вентилятор, смесительную камеру. Такая схема позволит существенно снизить тепловые потери на трассе и упростить

схему подготовки сушильного агента. Теплогенератор позволяет получить качественный сушильный агент с регламентируемой температурой, но при такой схеме остается сложным подвод и распределение сушильного агента по газораспределительной решетке.

Предложен третий вариант (рисунок 2а), заключающийся в исключении теплогенератора и использовании подрешеточного пространства как топочную и смесительную камеры. Горелки установлены непосредственно в топочной камере (рисунок 2б).

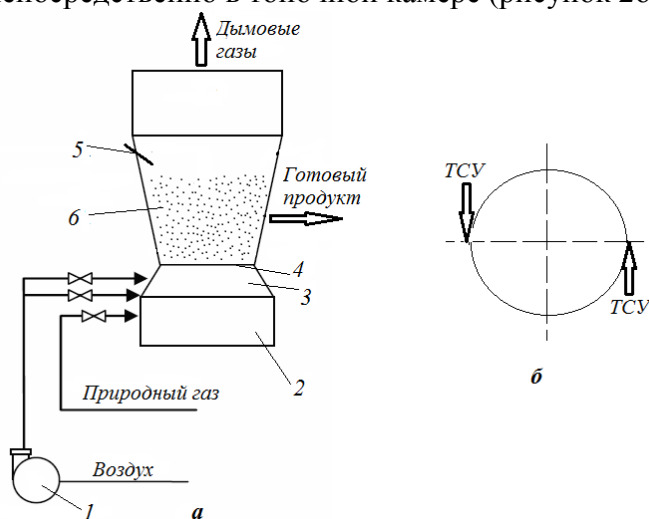


Рис. 2. Однокамерная сушильная установка непрерывного действия с топочной камерой (а) и схема расположения топливосжигающих устройств в топочной камере (б):

- 1 – воздуходувная машина; 2 – топочная камера; 3 – камера смешения;  
4 – газораспределительная решетка; 5 – форсунки для подачи раствора (3 шт.);  
6 – камера сушки

Это позволит снизить количество вспомогательного оборудования. Самым важным преимуществом является более эффективное использование тепла сушильного агента, за счет снижения тепловых потерь в отдельных элементах установки.

Обеспечивается равномерное распределение сушильного агента с одинаковой температурой по всей площади газораспределительной решетки, за счет чего снижается масса просыпи.

Схема работы печи КС устроена следующим образом – рабочий раствор поступает в верхнюю часть печи через форсунки 5, расположенные над зеркалом «кипящего слоя». Влага удаляется из печи вместе с топочными газами, а твердые частицы цинкового купороса потоком топочных газов удерживаются во взвешенном состоянии над газораспределительной решеткой 6, образуя «кипящий слой». Температура в слое от 200 до 270 °С (в среднем около 250 °С) – устанавливается из физико-химических свойств цинкового купороса, температура разложения которого 280 °С, и данных практики (исключить зарастание решетки). Температура в печи регулируется объемом раствора, поступающего на выпаривание. При температуре ниже 200 °С кипящий слой становится вязким из-за образования многоводного сульфата цинка, что ведет к зарастанию решетки. При температуре выше 270 °С сокращается производительность печи, ухудшается качество цинкового купороса из-за увеличения в нём нерастворимого остатка вследствие частичного термического разложения сульфата цинка на окись цинка ( $ZnO$ ) и сернистый ангидрид ( $SO_2$ ). В отходящих газах при этом повышается содержание  $SO_2$  [4].

Тепло, необходимое для выпаривания раствора, выделяется за счет сжигания природного газа в топке печи 2, расположенной под газораспределительной решеткой. Первичный воздух обеспечивает полноту сгорания природного газа, вторичный – обеспечивает снижение температуры продуктов сгорания с 1450 до 1000 °С.

При разработке теплового режима печи КС был произведен расчет горения природного газа, в результате балансовая температура составила 1450 °С. Тепловой баланс топочной камеры (представленный в таблице 1), который позволил определить коэффициент расхода

воздуха, необходимый для получения сушильного агента (горение и разбавление) при известной температуре продуктов сгорания под решеткой. Так же на основании выполненного материального баланса печи (представленный в таблице 2), произведен расчет теплового баланса печи (представленный в таблице 3) с целью расчета расхода природного газа при известных температурах готового материала и дымовых газов на выходе.

Таблица 1

Тепловой баланс топочной камеры (ТБ ТК)

Приход теплоты			Расход теплоты		
Статья	кДж/с (кВт)	%	Статья	кДж/с (кВт)	%
Химическая теплота топлива ( $Q_x$ )	3 368,5	98,5	Тепло, уходящее с сушильным агентом ( $Q_2$ )	3 321,36	97,1
Физическая теплота топлива ( $Q_T$ )	4,13	0,1	Потери в окружающую среду теплопроводностью через стенку и под ( $Q_{окр}$ )	99,64	2,9
Физическая теплота первичного и вторичного воздуха ( $Q_B$ )	48,37	1,4			
Итого	3 421,00	100	Итого	3 421,00	100

Расход вторичного воздуха был рассчитан исходя из баланса теплоты по уравнению:

$$(t_{пс} * c_{пс}^{t_{пс}}) V_{\Sigma}^{пс+в2} = Q_x + Q_{\phi}^r + Q_{\phi}^B + Q_5, \quad (1)$$

где  $Q_x$  – теплота горения природного газа, кДж/ч;

$Q_{\phi}^r$  – физическая теплота природного газа, кДж/ч;

$Q_{\phi}^B$  – физическая теплота воздуха, кДж/ч;

$Q_5$  – потери теплоты топкой, кДж/ч.

$$V_{в2} = V_{\Sigma}^{пс+в2} - V_{пс}, \quad (2)$$

где  $V_{пс}$  – расход продуктов сгорания, нм<sup>3</sup>/ч.

Коэффициент расхода воздуха на горение и разбавление, рассчитанный по тепловому балансу топочной камеры составил  $\alpha = 2,08$ .

Таблица 2

Материальный баланс печи КС

Приход материалов			Расход материалов		
Статья	кг/ч	%	Статья	кг/ч	%
Цинкосодержащий раствор ( $m_p$ ):	5 008, 50	10,40	Выход готового продукта ( $m_{гп}$ )	1 424	2,91
– содержание сульфата цинка	1 452,47	3,02	Масса пыли ( $m_{п}$ )	71,20	0,14
– содержание воды	3 556,04	7,38	Масса выпариваемой воды из раствора ( $m_{H_2O}$ )	3 584, 50	7,32
Природный газ на горение ( $m_{пг}$ )	339,56	0,71	Масса дымовых газов без учета пара ( $m_{дг}$ )	43 605, 96	89,63
Масса первичного воздуха на горение ( $m_{в1}$ )	5 412,52	11,24			
Масса вторичного воздуха на разбавление ( $m_{в2}$ )	37 392,71	77,65			
Итого	48 153,30	100	Итого	48 685,66	100
Невязка	-532,36	-1,1			

Невязка МБ составила – 1,1%, что соответствует первому классу точности. Причиной этому могут служить подсосы в рабочее пространство через окно выгрузки.

Таблица 3

Тепловой баланс печи КС

Приход теплоты			Расход теплоты		
Статья	кДж/с (кВт)	%	Статья	кДж/с (кВт)	%
Химическая теплота топлива ( $Q_x$ )	3 368,5	93,46	Полезные затраты теплоты на сушку ( $Q_{м2}$ )	70,24	1,97
Физическая теплота топлива ( $Q_T$ )	4,13	0,12	Тепло, уходящее с дымовыми газами ( $Q_2$ )	706,21	19,73
Физическая теплота первичного и вторичного воздуха ( $Q_v$ )	48,37	1,35	Потери теплоты с водой раствора:	2 688,11	75,33
Физическая теплота раствора:	181,21	5,07	– тепло, расходуемое на нагрев воды ( $Q_{нагр}$ )	245,48	6,88
– теплота, вносимая сухим материалом ( $Q_{м1}$ )	17,56	0,49	– тепло, расходуемое на парообразование ( $Q_{пар}$ )	2 246, 29	62,95
			– потери тепла на нагрев водяных паров ( $Q_{нагр. пар}$ )	196,34	5,5
– теплота, вносимая влагой ( $Q_{вл}$ )	163,65	4,58	Потери в окружающую среду ( $Q_5$ ):	104,00	2,91
			– топкой	64,13	1,79
			– рабочим пространством	39,87	1,12
			Потери тепла с пылью ( $Q_p$ )	2,03	0,06
Итого	3 568, 56	100	Итого	3 568,56	100

Расход газа, рассчитанный по уравнению теплового баланса печи КС, составил  $V=0,09 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Из таблицы 3 ТБ КС, что наибольшее количество теплоты затрачивается на удаление воды. Следовательно, для снижения этих потерь можно рекомендовать предварительную подготовку растворов с доведением плотности до максимального значения (то есть снизить содержание влаги).

Выводы:

1) наиболее рациональной конструкцией сушильной установки с кипящим слоем в конструктивном исполнении является расположение топочной камеры и камеры смешения под газораспределительной решеткой;

2) для снижения расхода газа за счет уменьшения массы воды в растворе и потерь в топочной камере необходимо предусмотреть предварительную подготовку растворов с увеличением плотности до максимально возможного значения по вязкости раствора;

3) увеличение производительности печи возможно за счет создания равномерного скоростного Влагосодержание готового продукта поддерживается за счет стабильной температуры в слое.

## Список использованных источников

1. Нефтегазхимкомплект.рф [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://iodine.agronationale.ru/goods/kuporos\\_tsinkovyy-40462.html](http://iodine.agronationale.ru/goods/kuporos_tsinkovyy-40462.html) – свободный. – Рус.
2. FindPatent.ru. Патентный поиск [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/220/2202517.html> – свободный. – Рус.
3. Файловый архив для студентов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.studfiles.ru/preview/2066364/> – свободный. – Рус.
4. Эксплуатация и устройство печей кипящего слоя для выпаривания растворов, прокали и сушки материалов: опыт Усть-Каменогорского свинцово-цинкового комбината им. В.И.Ленина / Бурдаков Ю.М., Полупанов Г.Г., Кучин Г.М. – М: Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований цветной металлургии, 1965. – 55 с.

УДК 620.91

**С. А. Шукин, А. Н. Лошкарёв**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В КОТЛЕ КВ-ГМ2

### Аннотация

*В работе представлено исследование методами компьютерного моделирования процесса сжигания жидкого топлива форсункой ФП-1100 в котельной установке КВ-ГМ 2. Исследование производилось с помощью прикладного пакета ANSYS CFX. В качестве топлива в данной работе использовался керосин, а в качестве окислителя - воздух. Итоги работы представлены графически и отражают температурные и скоростные поля, а также массовые доли реагирующих компонентов.*

*Ключевые слова: топливосжигающее устройство, форсунка, жидкое топливо, компьютерное моделирование, горение, ANSYS CFX, температурные поля.*

### Abstract

*In work research by methods of computer modeling of process of combustion of liquid fuel by FP-1100 nozzle in the KV-GM 2 boiler installation is presented. Research was made by means of an applied ANSYS CFX package. As fuel in this work kerosene, and as an oxidizer - air was used. Results of work are presented graphically and reflect temperature and high-speed fields, and also mass fractions of the reacting components.*

*Keywords: fuel burning device, nozzle, liquid fuels, computer modeling, combustion, ANSYS CFX, the temperature field.*

Котельная установка КВ-ГМ2 с номинальной мощностью 2 МВт (тип котла трехходовой жаротрубный) используется для нагрева воды с номинальным расходом 68,67 т/ч (рис. 1). Котел работает на различных видах топлива (природный газ, мазут, сырая нефть). Необходимо проверить, обеспечит ли форсунка сжигание топлива в рабочем пространстве так, чтобы процесс образования пламени завершился в пределах жаровой камеры.

Для распыливания топлива применяют специальные форсунки. Форсунка пневматическая производительностью 200 кг/ч (рис. 2) предназначена для распыливания мазута при его сжигании газомазутной горелкой ГМП-12 [2].